去氢木香内酯与杀虫剂复配对烟粉虱的防效及其对作物的增产作用

杨妮娜[1] 郑玉铃[1,2] 尹海辰[1] 丛胜波[1] 李文静[1] 许 冬[1]
张建民[2] 史晓斌[3] 万 鹏[1*]

（1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所，农作物重大病虫草害防控湖北省重点实验室，农业农村部华中作物有害生物综合治理重点实验室，武汉 430064；2. 长江大学生命科学学院，湖北 荆州 434025；3. 湖南省农业科学院植物保护研究所，长沙 410000）

摘要：为开发以去氢木香内酯为核心的烟粉虱*Bemisia tabaci*绿色防控产品，测定去氢木香内酯与噻虫嗪和氟啶虫胺腈两种杀虫剂复配对烟粉虱的室内毒力，并测定室内毒力较好组合的田间防效及其对辣椒农艺性状和产量的影响。结果显示：去氢木香内酯与噻虫嗪和氟啶虫胺腈复配均对烟粉虱有增效作用，其中噻虫嗪+去氢木香内酯的增效比（2.215）高于氟啶虫胺腈+去氢木香内酯的增效比（1.409）；施药后3 d和9 d，54.688 mg/L 25%噻虫嗪与2 μg/mL去氢木香内酯复配对烟粉虱的校正防效分别为76.76%和87.08%，显著高于54.688 mg/L 25%噻虫嗪的校正防效。此外，20 μg/mL去氢木香内酯可显著促进辣椒生长，显著提高辣椒产量。表明去氢木香内酯具有作为绿色植保增效剂和植物生长调节剂的双重应用潜力。

关键词：去氢木香内酯；烟粉虱；杀虫剂；增效作用；农艺性状；产量

Control efficacy of dehydrocostus lactone combined with pesticides against tobacco whitefly *Bemisia tabaci* and its effect on crop yield

Yang Nina[1] Zheng Yuling[1,2] Yin Haichen[1] Cong Shengbo[1] Li Wenjing[1] Xu Dong[1]
Zhang Jianmin[2] Shi Xiaobin[3] Wan Peng[1*]

（1. Key Laboratory of Integrated Pest Management for Crops in Central China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Hubei Key Laboratory of Crop Disease, Insect Pests and Weeds Control; Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, Hubei Province, China; 2. College of Life Sciences, Yangtze University, Jingzhou 434025, Hubei Province, China; 3. Institute of Plant Protection, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410000, Hunan Province, China）

Abstract: To develop a green prevention and control product against the tobacco whitefly *Bemisia tabaci* with dehydrocostus lactone as the core component, laboratory toxicity tests were conducted on the combinations of dehydrocostus lactone with two insecticides, thiamethoxam and sulfoxaflor. The combination showing better laboratory toxicity was selected for field trials, in which its field control efficacy and effects on pepper agronomic traits and yield were evaluated. The results showed that the combinations of dehydrocostus lactone with both thiamethoxam and sulfoxaflor exhibited synergistic efficacy against *B. tabaci*. The synergistic ratio of the thiamethoxam + dehydrocostus lactone combina-

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFD1401200），湖北省农业科技创新中心项目（2026-620-000-001-011），湖北省区域科技创新计划援疆援藏项目（2025EIA061）

* 通信作者（Author for correspondence），E-mail：wanpenghb@126.com

收稿日期：2026-05-22

tion (2.215) was higher than that of the sulfoxaflor + dehydrocostus lactone combination (1.409). At three and nine days after application, the corrected control efficacy of the combination of 54.688 mg/L 25% thiamethoxam with dehydrocostus lactone against *B. tabaci* was 76.76% and 87.08%, respectively, which were significantly higher than those of 54.688 mg/L 25% thiamethoxam alone at the same concentration. Furthermore, 20 μg/mL dehydrocostus lactone significantly promoted pepper growth and increased pepper yield. These results demonstrate that dehydrocostus lactone can serve as both a green plant protection synergist and plant growth regulator with dual application prospects.

Key words: dehydrocostus lactone; *Bemisia tabaci*; insecticide; synergistic effect; agronomic trait; yield

烟粉虱 *Bemisia tabaci* 是一种全球性的农业害虫，其可为害蔬菜、花卉等600余种作物，每年可造成数十亿美元的经济损失（褚栋和张友军，2018）。烟粉虱除了通过取食韧皮部、刺吸植物汁液为害作物外，还可通过分泌蜜露诱发煤污病，更严重的是其通过取食植物可传播400多种植物病毒，严重影响植物的正常生长，进而影响作物的产量和品质（Xia et al.，2021）。目前，对烟粉虱的防治大多依赖化学药剂，而烟粉虱世代重叠现象严重，用药频繁，不仅污染环境，杀伤天敌，而且易引起烟粉虱产生抗药性（Yang et al.，2020）。农药与增效助剂联合使用不仅能有效提高药剂的防效，同时能降低农药使用量，延缓害虫抗药性的产生，因此，筛选和开发新型绿色高效的增效助剂，对保障粮食安全生产和减少农业面源污染至关重要。

植物源次生代谢产物大都来源于植物提取物，在有效施用浓度条件下对作物相对安全，对人、畜和环境都相对友好，且不易使害虫产生抗药性。因此，常被作为农药的混配助剂或不同农药复配的增效助剂（Saikumar et al.，2025）。例如，辣木根 *Moringa oleifera* 提取物能诱导烟粉虱体内过氧化物酶、多酚氧化酶、苯丙氨酸解氨酶等防御酶过表达，对氟吡呋喃酮、双丙环虫酯等新型杀虫剂有很好的增效作用（Roy et al.，2025）；植物精油香叶醇与四环素和土霉素联合使用能显著提高杀菌剂四环素和土霉素在柑橘叶片中的渗透量，从而有效减少柑橘黄龙病菌 *Candidatus* Liberibacter asiaticus 数量（Chen et al.，2025）；添加4种植物源增效剂后，46%福鼎虫酰胺·啶虫脒的用量显著降低46%，同时对蚜虫的防效增加（李彦飞等，2023）。另外，植物源活性成分还可以作为生物刺激素调控植物激素平衡与土壤微生态，诱导作物提高免疫抗性，从而促进植物生长，增强植物的抗逆性（Humbal & Pathak，2023）。例如，在半沙漠植物漆树属 *Rhus* 常绿漆树 *R. virens* 和 *R. muellerl* 提取物中丁香醛、阿魏酸和绿原酸等酚类化合物能显著促进辣椒根部和地上部生长，其效果优于商业生根剂（Ramírez-Pérez et al.，2025）；泡叶藻 *Ascophyllum nodosum* 提取物通过协调水杨酸、生长素和细胞分裂素信号通路促进拟南芥 *Arabidopsis thaliana*）上部分生长，从而显著提高作物产量和抗逆性（Olaetxea et al.，2024）；虎杖 *Polygonum cuspidatum* 促生效果明显，其残渣还田后作物根中生长素和玉米素核苷水平提升11.0%~46.0%，从而提高植物株高、茎粗、叶片数及根系生物量（Liu et al.，2025）；当玉米密度种植大且倒伏时，喷施乙烯利和由植物生长调节剂DA-6与二氢卟吩铁组合的增效剂能显著提高玉米叶绿素的含量和净光合速率，同时提高玉米穗粒数和粒重，从而提高产量（Wang et al.，2025）。尽管植物源活性成分在农药增效助剂和植物促生方面已有一定研究，但目前针对烟粉虱的植物源化合物的研究仅限于室内毒力测定和短期田间防效，关于其与杀虫剂复配对田间害虫的整体防效及其对作物农艺性状和产量影响的系统研究较少。

噻虫嗪是新烟碱类药剂的第2代产品，是一种烟碱型乙酰胆碱受体激动剂，通过干扰昆虫的神经系统，使其过度兴奋，最终死亡；氟啶虫胺腈属于砜亚胺类杀虫剂，是一种烟碱型乙酰胆碱受体竞争性调节剂，这两种药剂对刺吸式口器害虫均有良好的防效（江彤等，2026；刘向涛等，2026；史雪芹等，2026），筛选和开发新型的植物源增效助剂与噻虫嗪和氟啶虫胺腈复配是延缓烟粉虱抗性发展的重要途径。本课题组前期从菊科植物云木香 *Asteraceae acostu* 中分离得到一种倍半萜化合物去氢木香内酯，体外毒理学试验结果显示去氢木香内酯具有诱导细胞凋亡的能力；室内生物测定显示浓度小于20 μg/mL的去氢木香内酯对烟粉虱无直接毒杀作用（Yang et al.，2026）。为进一步明确化合物去氢木香内酯的应用潜力，测定去氢木香内酯与噻虫嗪和氟啶虫胺腈这两种杀虫剂复配对烟粉虱的室内毒力，并测定室内毒力较好组合的田间防效及其对辣

椒农艺性状和产量的影响，以期为开发以去氢木香内酯为核心的烟粉虱绿色防控产品提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试昆虫与植物：烟粉虱室内种群为MED隐种，从中国农业科学院蔬菜花卉研究所引进，用长60 cm、宽60 cm、高60 cm的养虫笼长期饲养在湖北省农业科学院植保土肥研究所养虫室的棉花植株上，养虫室的温度为（26±2）℃，相对湿度为（65±5）%，光周期为16 L∶8 D，光照强度为3 000 lx，饲养期间未接触任何化学农药，取24 h内初羽化的烟粉虱雌成虫供试。棉花品种为京冀一号，由湖北省农业科学院粮食作物研究所提供，种植于装有营养基质、直径8 cm、高12 cm的营养钵中，每钵1株。营养钵置于温室里培养，温室条件同养虫室条件一致，每3~4 d浇水1次，温室均为无虫环境，种植期间，未接触任何化学药剂，待植株长至4~5片真叶后用来饲养试虫。辣椒品种为赣洪，为市场常规栽培品种，辣椒种子和营养基质均购于武汉市洪山区农丰种子经营部。

药剂、试剂和仪器：纯度≥98%的去氢木香内酯，西格玛奥德里奇（上海）贸易有限公司；25%噻虫嗪（thiamethoxam）水分散粒剂，沾化国昌精细化工有限公司；22%氟啶虫胺腈（sulfoxaflor）悬浮剂，科迪华农业科技有限责任公司。试剂均为国产分析纯。台州3WBD-20型智能电动喷雾器，台州市华骄机械有限公司。

1.2 方法

1.2.1 两种杀虫剂对烟粉虱室内毒力的测定

采用琼脂保湿法（Wang et al.，2020）测定噻虫嗪和氟啶虫胺腈两种杀虫剂对烟粉虱的室内毒力。根据预试验结果，将噻虫嗪和氟啶虫胺腈分别配制成100、50、25、12.5、6.25和3.125 mg/L六个浓度梯度，以清水处理为对照。用打孔器将新鲜的棉花叶片打成直径为2 cm的叶碟，分别置于上述药液中浸泡10 s，取出自然晾干，将叶片平铺在装有2 mL 2%琼脂、直径2 cm、高8 cm的指型管中，叶背面朝上。每管接入24 h内初羽化的烟粉虱雌成虫25头（1个重复），用棉塞将指型管封口后倒置于培养箱内，培养箱的温度为（26±2）℃，相对湿度为（65±5）%，光周期为16 L∶8 D，分别于接虫后24 h和48 h观察试虫的死亡情况，统计死亡数量，计算校正死亡率。将毛笔尖轻触试虫虫体不能爬动者视为死亡。校正死亡率=（处理组死亡率−对照组死亡率）/（1−对照组死亡率）×100%。每个处理重复5次。对照死亡率在10%以下为有效试验。采用软件SPSS 21.0分别计算各药剂的毒力回归方程、致死中浓度LC_{50}及其95%置信限。

1.2.2 去氢木香内酯与杀虫剂复配对烟粉虱的毒力

采用琼脂保湿法（Wang et al.，2020）测定去氢木香内酯分别与噻虫嗪和氟啶虫胺腈两种杀虫剂对烟粉虱的室内毒力。分别以1.2.1确定的48 h时噻虫嗪和氟啶虫胺腈对烟粉虱的LC_{50}为最高浓度，将噻虫嗪等比稀释成12.5、6.25、3.125、1.562 5、0.781 25和0.390 625 mg/L六个浓度，将氟啶虫胺腈等比稀释成25、12.5、6.25、3.125、1.562 5和0.781 25 mg/L六个浓度，再将每个浓度的杀虫剂分别与去氢木香内酯混配，使得混配中去氢木香内酯的终浓度均为2 μg/mL，以2 μg/mL去氢木香内酯溶液为空白对照。制备叶碟、浸泡叶片、接虫、试虫培养等同1.2.1。接虫后48 h观察试虫的死亡情况，统计死亡数量，计算校正死亡率。分别计算各复配的LC_{50}，方法同1.2.1。根据LC_{50}计算增效比。增效比=单独杀虫剂对烟粉虱的LC_{50}/复配药剂对烟粉虱的LC_{50}（Brindley，1977）。若增效比>1.000，表示去氢木香内酯对杀虫剂有增效作用；若增效比=1.000，表示去氢木香内酯对杀虫剂有相加作用；若增效比<1.000，则表示去氢木香内酯对杀虫剂有拮抗作用。

1.2.3 复配对烟粉虱的田间防效试验

根据1.2.2结果，去氢木香内酯与噻虫嗪复配的增效作用最明显，因此选此组合进行田间试验。2023年4—7月中旬在湖北省武汉市新洲区农业科学研究所实验基地进行田间药效试验，试验区采用设施大棚避雨和地膜覆盖栽培。试验期间辣椒处于快速生长期，株距约35 cm，行距约45 cm，各小区栽培、灌溉条件一致，辣椒植株长势良好。试验共设5个处理，即78.125 mg/L（田间推荐剂量）25%噻虫嗪、54.688 mg/L（田间推荐剂量减量30%）25%噻虫嗪、2 μg/mL去氢木香内酯、2 μg/mL去氢木香内酯+54.688 mg/L 25%噻虫嗪和清水对照，每个处理重复4次，每个小区长5 m，宽4 m，面积为20 m^2（1个重复），小区随机区组排列，各小区除喷施药剂不同外，其他管理措施均一样。采用台州3WBD-20型智能电动喷雾器对辣椒叶片正反面均匀喷雾，每个小区喷1.2 L。分别在施药前1 d、施药后3 d和9 d调查各小区烟粉虱的发生情况。每次调查均在清晨07：00点前完成，此处烟粉虱活动较弱，便于调查。

调查时采用五点取样法，每点定点调查6株，随机调查每株辣椒上、中、下各2片叶片上的所有活成虫数量，共调查30株辣椒，并挂牌标记以便后续观察活虫数量。计算虫口减退率和防效。虫口减退率=（药前虫口数量−药后虫口数量）/药前虫口数量×100%，防效=（1−（对照区施药前虫口基数×处理区施药后活虫数量）/（对照区施药后活虫数量×处理区施药前虫口基数））×100%。

1.2.4 复配浓度对辣椒农艺性状及产量影响的测定

2023年4—7月中旬在湖北省武汉市新洲区农业科学研究所实验基地进行田间药效试验，试验区采用设施大棚避雨和地膜覆盖栽培。试验期间辣椒处于快速生长期，株距约35 cm，行距约45 cm，各小区栽培、灌溉条件一致，辣椒植株长势良好。根据前期预试验结果，选择对烟粉虱无直接毒杀活性的去氢木香内酯浓度进行试验。本试验共设3个处理，即2 μg/mL、20 μg/mL去氢木香内酯和清水对照，每个处理重复4次，每个小区长5 m，宽4 m，面积为20 m^2（1个重复），小区随机区组排列，各小区除喷施药剂不同外，其他管理措施均一样。采用台州3WBD-20型智能电动喷雾器对辣椒叶片正反面均匀喷雾，每个小区喷1.2 L。于辣椒移栽后第7天开始第1次喷施处理，每隔14 d再喷施1次，整个生长期共喷施3次。在辣椒采收期进行辣椒农艺性状及产量测定。各小区采用Z字形五点取样，每点定点调查6株，共调查30株，分别测量植株株高、有效分枝数、单株结果数，每株随机摘取3个成熟的果实，分别标记好带回实验室用游标卡尺测量果实横径、果实纵径和单果质量。采用田间抽样测产推定产量法计算辣椒产量。

1.3 数据分析

采用SPSS 21.0软件对试验数据进行单因素方差分析，应用Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 两种杀虫剂对烟粉虱的室内毒力

随着时间延长，噻虫嗪和氟啶虫胺腈对烟粉虱雌成虫的毒力急剧上升，LC_{50}分别从37.592 mg/L和32.388 mg/L大幅降低至6.214 mg/L和7.333 mg/L（表1）。

表1 两种杀虫剂对烟粉虱成虫的室内毒力

Table 1 Indoor toxicity of two insecticides to adults of *Bemisia tabaci*

药剂 Insecticide	处理时间 Processing time/h	毒力回归方程 Virulence regression equation	LC_{50}/(mg/L)	95%置信限 95% confidence limit/(mg/L)	χ^2
噻虫嗪 Thiamethoxam	24	y=−1.879+1.193x	37.592	27.962−56.331	12.917
	48	y=−0.645+0.104x	6.214	5.100−7.211	20.621
氟啶虫胺腈 Sulfoxaflor	24	y=−1.348+0.042x	32.388	29.128−36.343	12.466
	48	y=−0.702+0.096x	7.333	5.878−8.771	6.811

x：杀虫剂浓度的对数值；y：校正死亡率的概率值。x: Logarithm of insecticide concentrations; y: probability value of corrected mortality rate.

2.2 去氢木香内酯与杀虫剂复配对烟粉虱的毒力

去氢木香内酯与噻虫嗪和氟啶虫胺腈复配后，对烟粉虱成虫的LC_{50}分别为2.805 mg/L和5.204 mg/L，其增效比分别为2.215和1.409，增效比均都大于1.000（表2）。表明与去氢木香内酯联用后噻虫嗪和氟啶虫胺腈对烟粉虱的毒杀效果均显著增强，其中噻虫嗪+去氢木香内酯组合的增效作用最明显，因此选择这个组合进行田间试验。

表2 两种杀虫剂与去氢木香内酯复配对烟粉虱成虫的室内毒力

Table 2 Indoor toxicity of compounding of two pesticides with dehydrocostus lactone to adults of *Bemisia tabaci*

处理 Treatment	毒力回归方程 Virulence regression equation	LC_{50}/(mg/L)	95%置信限 95% confidence limit/(mg/L)	χ^2	增效比 Synergistic ratio
噻虫嗪+去氢木香内酯 Thiamethoxam+dehydrocostus lactone	y=−0.309+0.110x	2.805	1.011−4.083	61.901	2.215
氟啶虫胺腈+去氢木香内酯 Sulfoxaflor+dehydrocostus lactone	y=−1.347+0.259x	5.204	4.694−5.776	12.219	1.409

x：杀虫剂浓度的对数值；y：校正死亡率的概率值。x: Logarithm of insecticide concentrations; y: probability value of corrected mortality rate.

2.3 去氢木香内酯与噻虫嗪复配对烟粉虱的防效

2 μg/mL去氢木香内酯施用后3 d和9 d对烟粉虱的校正防效分别为10.23%和15.80%，表明低剂量的去氢木香内酯对烟粉虱无防效。54.688 mg/L 25%噻虫嗪+2 μg/mL去氢木香内酯施用后3 d对烟粉虱的校正防效最高，为76.76%，显著高于其他处理（P<0.05）；施用后9 d对烟粉虱的校正防效为87.08%，与单独使用78.125 mg/L 25%噻虫嗪的校正防效相当，但显著高于其他处理（P<0.05，表3）。表明去氢木香内酯对噻虫嗪有增效作用，可以作为增效剂。

表3 去氢木香内酯与噻虫嗪混配对烟粉虱的田间防效

Table 3 Field efficacy of compounding of dehydrocostus lactone with thiamethoxam against *Bemisia tabaci*

处理 Treatment	施药后3 d 3 d after application		施药后9 d 9 d after application	
	虫口减退率 Insect population reduction rate/%	校正防效 Corrected control efficacy/%	虫口减退率 Insect population reduction rate/%	校正防效 Corrected control efficacy/%
78.125 mg/L 25%噻虫嗪 78.125 mg/L 25% thiamethoxam	67.96±5.54 b	68.61±2.50 b	81.50±3.85 a	84.38±2.76 a
54.688 mg/L 25%噻虫嗪 54.688 mg/L 25% thiamethoxam	33.07±4.29 c	33.83±4.35 c	33.44±9.32 b	43.81±4.96 b
2 μg/mL去氢木香内酯 2 μg/mL dehydrocostus lactone	6.84±1.97 d	10.23±7.28 d	1.13±0.98 c	15.80±5.94 c
54.688 mg/L 25%噻虫嗪+2 μg/mL去氢木香内酯 54.688 mg/L 25% thiamethoxam+2 μg/mL dehydrocostus lactone	76.37±2.93 a	76.76±1.04 a	84.52±2.07 a	87.08±2.42 a
清水对照 Clean water control	−1.51±9.59 e	−	−18.16±7.69 d	−

表中数据为平均数±标准误。同列数据后不同小写字母表示经Duncan氏新复极差法检验差异显著（P<0.05）。Data are mean±SE. Different lowercase letters within the same column indicate significant difference according to Duncan's new multiple range test (P<0.05).

2.4 复配浓度对辣椒农艺性状及产量的影响

不同浓度去氢木香内酯均对辣椒株高和果实大小有促进作用。20 μg/mL去氢木香内酯处理后，辣椒的株高和果实纵径分别为38.70 cm和3.35 cm，与对照差异不显著；辣椒的果实横径、有效分枝数、单株结果数、单果质量和产量分别为13.89 cm、45.97个、18.53个、43.86 g和3.65 kg/m^2，均显著高于对照（P<0.05，表4）。2 μg/mL去氢木香内酯处理后，辣椒的株高、果实横径和果实纵径分别为37.67、13.20和3.45 cm，与其他两个处理差异不显著；辣椒植株的有效分枝数、单株结果数分别为37.37个和15.20个，显著低于20 μg/mL去氢木香内酯处理（P<0.05），但与对照差异不显著；辣椒的单果质量和产量分别为40.18 g和2.72 kg/m^2，显著高于对照（P<0.05），但显著低于20 μg/mL去氢木香内酯处理（P<0.05，表4）。表明外源施用去氢木香内酯不仅对植株安全，且能有效促进辣椒的生长发育，特别是高浓度（20 μg/mL浓度）处理能显著增加辣椒的有效分枝数、单株结果数和单果重，从而显著提高辣椒产量。

3 讨论

大量研究表明从天然植物中提取的活性成分与化学药剂混合使用可产生协同增效作用（Norris et al.，2018）。例如，Zhu et al.（2024）研究发现0.5% γ-萜品烯和芳樟醇与β-氯氰菊酯复配对德国小蠊*Blattella germanica*有显著的增效作用，且能减少β-氯氰菊酯的用量；植物次生代谢产物丁香酚和麝香草酚与溴虫腈复配对果蝇有较好的杀虫活性（Yoon & Tak，2022）；张洁等（2018）研究表明冬青油、芳樟油、黄樟油、白樟油和香樟油5种植物精油可提高烯丙菊酯对淡色库蚊*Culex pipiens pallens*的杀虫活性；植物次生代谢产物透骨草木质素化合物与农药氯菊酯、茚虫威等复配对甜菜夜蛾*Spodoptera exigua*和东方黏虫*Mythimna separata*均有增效作用（刘豪，2024）；罂粟科植物白屈菜*Chelidonium majus*中活性成分白屈菜碱与溴氰菊酯复配对小菜蛾*Plutella xylostella*也有增效作用（刘雨阳，2019）。植物次生代谢产物去氢木香内酯，是一种倍半萜类化合物，可开发为新型杀虫剂（Wu et al.，2016）。本研究结果显示不管是在室内毒力测定试验中还是在田间药效试验中去氢木香内酯均对杀虫剂有明显的增效作用，表明去氢木香内酯作为一种天然植物源化合物，能有效增强噻虫嗪的杀虫活性，降低杀虫剂的使用量，从而达到减施增效的作用。

表4 去氢木香内酯浓度对辣椒农艺性状及产量的影响

Table 4 Effects of concentration of dehydrocostus lactone on pepper agronomic traits and yield

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	果实 Fruit/cm		有效分枝数 No. of effective branches	单株结果数 No. of fruits per plant	单果质量 Mass of single fruit/g	产量 Yield/（kg/m²）
		横径 Transverse diameter	纵径 Longitudinal diameter				
2 μg/mL 去氢木香内酯 2 μg/mL dehydrocostus lactone	37.67±7.32 a	13.20±1.63 ab	3.45±0.58 a	37.37±4.73 b	15.20±1.73 b	40.18±5.20 b	2.72±0.22 b
20 μg/mL 去氢木香内酯 20 μg/mL dehydrocostus lactone	38.70±5.36 a	13.89±1.20 a	3.35±0.58 a	45.97±8.17 a	18.53±2.74 a	43.86±3.83 a	3.65±0.64 a
清水对照 Clean water control	35.37±6.77 a	12.53±1.26 b	3.36±0.67 a	37.23±5.62 b	14.70±1.56 b	33.85±4.37 c	2.22±10.24 c

表中数据为平均数±标准误。同列数据后不同小写字母表示经Duncan氏新复极差法检验差异显著（P<0.05）。Data are mean±SE. Different lower case letters within the same column indicate significant difference according to Duncan's new multiple range test (P<0.05).

去氢木香内酯是诱导向日葵种子萌发的关键因子，在去氢木香内酯含量高的向日葵品系中，根系分泌物能诱导更高的种子萌发率（Wu et al.，2022）。本研究结果显示不同浓度去氢木香内酯处理对辣椒植株有明显的促生作用，且能显著提高辣椒的产量，尤其是高浓度（20 μg/mL）的去氢木香内酯，在提高单果质量和单株结果数方面更有优势，且对植株安全。因此，去氢木香内酯可作为一种植物生长调节剂，具有广阔的应用前景。Yang et al.（2026）研究表明，去氢木香内酯处理后，植物叶片内酚类物质含量降低28%，茉莉酸类物质含量降低47%，同时茉莉酸类物质表达相关基因丙二烯氧化物环化酶基因（allene oxide cyclase，AOC）和12-氧-植物二烯酸还原酶3（12-oxo-phytodienoic acid reductase 3，OPR3）基因的表达量也显著降低，表明去氢木香内酯能显著抑制茉莉酸类物质通路，降低次生代谢产物酚类物质的含量，除了茉莉酸类物质信号通路外，去氢木香内酯是否还影响了其他植物激素的表达以及这些激素变化与植物生长之间有怎样的调控机制目前尚不清楚，后续将继续针对去氢木香内酯与植物互作机制进行深入研究。

本研究通过田间药效试验发现低剂量的噻虫嗪与去氢木香内酯复配是一种高效的杀虫剂组合。因为试验条件限制，本研究只进行了去氢木香内酯与噻虫嗪一种药剂的田间复配增效试验，下一步还将继续开展去氢木香内酯与氟啶虫胺腈及其他药剂的复配田间药效试验，进一步验证去氢木香内酯的增效作用。后续也将继续对去氢木香内酯的生物活性及其对杀虫剂的增效机制进行深入研究，为去氢木香内酯作为一种潜在的植物源增效剂提供更多的数据支撑。

参 考 文 献（References）

Brindley WA. 1977. Synergist differences as an alternate interpretation of carbaryl-piperonyl butoxide toxicity data. Environmental Entomology, 6(6): 885−888

Chen SN, Yuan A, Wang HF, Yang DB, Cui L, Hao FJ, Yan XJ, Yuan HZ. 2025. Enhancing agrochemical delivery in citrus leaves with geraniol: a promising strategy for controlling huanglongbing (HLB). Pest Management Science, 81(3): 1274−1285

Chu D, Zhang YJ. 2018. Research progress on the damages and management of *Bemisia tabaci* (Gennadius) in China over the past 10 years. Plant Protection, 44(5): 51−55 (in Chinese) [褚栋, 张友军. 2018. 近10年我国烟粉虱发生为害及防治研究进展. 植物保护, 44(5): 51−55]

Humbal A, Pathak B. 2023. Influence of exogenous elicitors on the production of secondary metabolite in plants: a review ("VSI: secondary metabolites"). Plant Stress, 8: 100166

Jiang T, Wang SX, Ren JL, Zhao WJ, Pu ZT, Wang XP. 2026. Cotoxicity and field control efficacy of thiamethoxam 21% SC combined with 17 insecticides against *Frankliniella intonsa* on alfalfa. Journal of Environmental Entomology, 48(1): 279−290 (in Chinese) [江彤, 王顺霞, 任俊林, 赵文军, 蒲振庭, 王新谱. 2026. 21%噻虫嗪悬浮剂与17种杀虫剂复配对苜蓿花蓟马的联合毒力及田间防效. 环境昆虫学报, 48(1): 279−290]

Li YF, Feng ZT, Wang GQ, Zhang XJ. 2023. Decrement and synergistic effect of plant-derived synergists in controlling aphids on pepper plants with flonicamid·acetamiprid 46% WG. Agrochemicals, 62(5): 374−377 (in Chinese) [李彦飞, 冯泽腾, 王国强, 张小军. 2023. 几种植物源增效剂对46%氟啶虫酰胺·啶虫脒WG防治辣椒蚜虫的减量增效研究. 农药, 62(5): 374−377]

Liu H. 2024. Study on insecticidal synergistic effect of lignan from *Phryma leptostachya* and its field application. Master thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [刘豪. 2024. 透骨草木脂素类化合物杀虫增效作用及田间应用研究. 硕士学位论

文. 杨凌: 西北农林科技大学]

Liu L, Mu HN, Zhang ZZ. 2025. Soil organic amendments with *Polygonum cuspidatum* residues enhance growth, leaf gas exchange, and bioactive component levels. Frontiers in Plant Science, 16: 1594905

Liu XT, Shi XQ, Cui L, Lu YH. 2026. Synergistic effects of organosilicon adjuvants on insecticides for the control of cotton aphid *Aphis gossypii*. Journal of Plant Protection, 53(2): 519−526 (in Chinese) [刘向涛, 史雪芹, 崔丽, 陆宴辉. 2026. 有机硅助剂对杀虫剂防治棉蚜的增效作用. 植物保护学报, 53(2): 519−526]

Liu YY. 2019. Insecticidal synergistic effect and metabolic mechanism of chelidonine. PhD thesis. Shenyang: Shenyang Agricultural University (in Chinese) [刘雨阳. 2019. 白屈菜碱杀虫增效作用及其代谢机制研究. 博士学位论文. 沈阳: 沈阳农业大学]

Norris E, Johnson J, Gross A, Bartholomay L, Coats J. 2018. Plant essential oils enhance diverse pyrethroids against multiple strains of mosquitoes and inhibit detoxification enzyme processes. Insects, 9(4): 132

Olaetxea M, Garnica M, Erro J, Sanz J, Monreal G, Zamarreño AM, García-Mina JM. 2024. The plant growth-promoting effect of an *Ascophyllum nodosum* (L.) extract derives from the interaction of its components and involves salicylic- , auxin- and cytokinin-signaling pathways. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 11: 190

Ramírez-Pérez C, Ramírez H, Carrillo-Lomelí DA, Moo-Huchin VM, Hernández-Pérez A, Peña-Ramos FM, Encina-Domínguez JA, Jasso de Rodríguez D. 2025. Biostimulant from semi-desert plant extracts for root and aerial growth of *Capsicum annuum* L. and *C. chinense* Jacq. seedlings. Industrial Crops and Products, 236: 121881

Roy D, Biswas S, Sarkar S, Biswas A, Mondal K, Das P, Adhikary S, Bárek V, Brestic M, Hossain A. 2025. Blending *Moringa* root extract with biorational insecticides: a potential approach for the management of *Bemisia tabaci* through synergistic interactions and induced plant defense. Plant Stress, 16: 100852

Saikumar T, Manideep S, Paschapur AU, Thrilekha D. 2025. Botanical pesticides: exploring successes, challenges, and future directions in sustainable pest management. Journal of Plant Diseases and Protection, 132(6): 175

Shi XQ, Zhao HR, Cui L, Lu W, Lu YH. 2026. Synergistic effects of sulfoxaflor combined with chlorpyrifos and the adjuvant AgroSpred Prime against the cotton aphid *Aphis gossypii*. Plant Protection, 52(2): 377−381, 404 (in Chinese) [史雪芹, 赵浩然, 崔丽, 路伟, 陆宴辉. 2026. 氟啶虫胺腈与毒死蜱及AgroSpred Prime助剂复配对棉蚜的增效作用. 植物保护, 52(2): 377−381, 404]

Wang R, Che WN, Wang JD, Luo C. 2020. Monitoring insecticide resistance and diagnostics of resistance mechanisms in *Bemisia tabaci* Mediterranean (Q biotype) in China. Pesticide Biochemistry and Physiology, 163: 117−122

Wang Z, Liu Z, Liu RX, Zhou BY, Wang XB, Ding ZS, Zhang RH, Li CF, Zhao M. 2025. Ethephon combined with synergist promoted grain formation by improving photosynthetic performance and floret development of maize. Field Crops Research, 334: 110140

Wu HB, Wu HB, Wang WS, Liu TT, Qi MG, Feng JC, Li XY, Liu Y. 2016. Insecticidal activity of sesquiterpene lactones and monoterpenoid from the fruits of *Carpesium abrotanoides*. Industrial Crops and Products, 92: 77−83

Wu WL, Huang HJ, Su JT, Yun XP, Zhang YX, Wei SH, Huang ZF, Zhang CX, Bai QJ. 2022. Dynamics of germination stimulants dehydrocostus lactone and costunolide in the root exudates and extracts of sunflower. Plant Signaling & Behavior, 17: 2025669

Xia JX, Guo ZJ, Yang ZZ, Han HL, Wang SL, Xu HF, Yang X, Yang FS, Wu QJ, Xie W, et al. 2021. Whitefly hijacks a plant detoxification gene that neutralizes plant toxins. Cell, 184(13): 3588

Yang NN, Preisser EL, Yin HC, Xu D, Jin LR, Cong SB, Wang P, Lei YY, Wan P. 2026. Exogenous application of dehydrocostus lactone induces volatile emission in cotton and enhances settling and oviposition by *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). Journal of Economic Entomology, 119(2): 1188−1197

Yang X, Deng S, Wei XG, Yang J, Zhao QN, Yin C, Du TH, Guo ZJ, Xia JX, Yang ZZ, et al. 2020. MAPK-directed activation of the whitefly transcription factor CREB leads to P450-mediated imidacloprid resistance. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 117(19): 10246−10253

Yoon J, Tak JH. 2022. Synergistic modes of interaction between the plant essential oils and the respiratory blocker chlorfenapyr. Pesticide Biochemistry and Physiology, 188: 105274

Zhang J, Liu H, Yang XW, Zhang X. 2018. Screening of plant-derived synergistic agents for mosquito coil based on the bioefficacy against *Culex pipiens pallens* (Diptera: Culicidae). Acta Entomologica Sinica, 61(1): 94−102 (in Chinese) [张洁, 刘辉, 杨晓伟, 张兴. 2018. 基于对淡色库蚊生物活性的植物源蚊香增效剂的筛选. 昆虫学报, 61(1): 94−102]

Zhu J, Lai YY, Wu YH, Wang JL, Wei JQ, Xu HH. 2024. Insecticidal activity of essential oils and their synergistic effect on improving the efficacy of β-cypermethrin against *Blattella germanica*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 72(18): 10295−10303

（责任编辑：张俊芳）